영상처리를 이용한 정적·동적 변위 계측과 속도·가속도 추산방식 연구

Measurement of Static and Dynamic Displacement by Image Processing and Study for Prediction Method of Velocity and Acceleration

허 석[†]·이 호 범^{*}·장 일 영^{**}

Seok Heo, Bum Ho Lee and Il Young Jang

(2010년 9월 17일 접수 ; 2011년 1월 20일 심사완료)

Key Words : Low-frequency Vibration Measurement(저주파수 진동계측), Image Processing(영상처리)

ABSTRACT

This paper is concerned with the measurement of static and dynamic displacement by image processing(IP) and study for prediction method of velocity and acceleration. To measure the displacement visually, the measurement system consists of a telephoto zoom camera, CCD(charge coupled device) image device and a computer. The specific target on the white board is used to calculate the displacement of the structure. The captured image is then converted into a pixel-based data and then analyzed numerically. The limitation of the system depends on the image capturing speed and the pixel-size of image. In this paper, we developed for the displacement measurement using the image processing method. The proposed method enables us to measure the vibration displacement, velocity and acceleration directly without any contact. The current resolution for the displacement measurement can be seen from the results.

1. 서 론

구조물의 변위, 속도와 가속도를 계측하는 방법으로는 가속도계, 스트레인 게이지, 지진계 등과 같이 구조물에 감지기를 부착하여 물리량을 계측하는 접촉식 방법⁽¹⁾과 레이저의 도플러 효과를 이용하는 비접촉식 방법 등이 있다. 특히, 저주파수로 진동하는 지진이나 대형 구조물 진동의 경우는 지진계나 가

속도계를 사용하여 진동을 계측하게 되는데, 감지기의 설치 및 계측에 많은 시간이 소요된다. 레이저 진동계측 장비를 사용하면 매우 정밀한 계측을 수행할 수 있으나 고가이기 때문에 쉽게 사용할 수 있는 장비는 아니다.

이 연구에서는 댐, 다리, 송전탑, 고층 건물, 원전 구조물과 같은 대형 구조물의 장시간에 걸친 정적 변위량 또는 큰 변위를 가지고 진동하는 경우에 대해 영상처리기법을 이용해 진동변위를 추출하는 방법을 개발하여 사용하고자 한다. 다리와 같은 대형 구조물의 큰 변위 진동 계측을 위해서는 GPS(global positioning system) 신호를 이용하는 방법⁽²⁾이 제시되기도 했지만 GPS 신호 자체의 오차와 계측 주파수의 제약으로 인해 실용화되지는 않고 있다.

머신비전(machine vision)과 영상처리(image proc-

[†] 교신저자; 정회원, 동국대학교 기계로봇에너지공학과
E-mail : manwoo@dongguk.edu
Tel : (02)2260-8581

^{*} (주)쓰리텍

^{**} 금오공과대학교 토목공학과

이 논문의 일부는 2010년 추계 소음진동 학술대회에서 발표되었음.

essing, IP)는 산업체에서 검사나 계측을 위해 활용되고 있는 방법이다. 이 연구에서는 진동하는 물체를 영상처리하여 진동 변위 응답을 측정하는 방법을 개발하고자 영상 카메라와 컴퓨터를 이용하여 변위 계측시스템을 구축하였다. 영상처리를 이용해 진동을 계측하는 방법에 대해서는 김⁽³⁾의 연구에서 처음 시도되었다. Wahbeh⁽⁴⁾도 영상 데이터에 기초한 진동 변위 측정 방법을 제안하였는데 LED를 표식물로 사용하는 방법을 제안하였다.

이 연구에서는 김⁽³⁾의 연구에서 제시한 방법을 개선하여 보다 정밀한 고속의 계산 알고리즘을 제시하였다. 또한 GUI(graphic user interface) 환경을 구축하여 실시간으로 진동계측을 수행할 수 있는 소프트웨어를 개발하였다. 영상처리를 이용하여 어떻게 변위를 측정하는지 가속도, PSD를 계측하는지에 관해서는 참고문헌⁽³⁾과 유사하며, LabView에서는 PSD에 관한 함수를 이용하였다.

영상처리의 응용 분야는 영화의 특수 효과, 얼굴이나 지문 인식을 통한 보안, 공장 자동화 시스템, 의학, 로봇 등과 같은 분야이다. 영상처리에 일반적으로 사용되는 카메라와 이미지 그래버(image grabber)는 NTSC(national television system committee)규약에 맞추어서 초당 30 또는 60 프레임으로 이미지 데이터를 출력하거나 획득할 수 있다. 따라서 이런 범용 영상처리 장비의 표본추출률(sampling rate)은 일반적으로 30 Hz라고 말할 수 있다. 이것은 구조물이 3 Hz 이하 정도의 저주파수로 진동하는 경우에는 충분히 변위 계측이 가능함을 의미한다. 또한, 계측 변위의 정밀도는 화상의 화소(pixel) 수와 렌즈의 배율에 의해 결정된다.

이 연구를 위한 연구진들은 이미 영상으로부터 물체의 형태나 움직임을 포착하는 컴퓨터 비전(computer vision)을 기반으로 하여 도로의 자동차 대수 와 속도를 측정하는 연구 과제를 기 수행한 바 있으며(Fig.1 참조) 이 연구를 통하여 CCD(charge coupled device) 카메라를 이용하여 도로를 주행하는 자동차의 수와 각 자동차의 속도를 추정할 수 있었다. 이 연구에서 개발하고자 하는 진동물리량 측정 은 도로 자동차 화상 처리 시스템을 고정 표지판 측정에 활용된 예로 볼 수 있다. 국내 모 기업 연구소에서는 검중용으로 레이저 센서를 이용한 비접촉식 변위 변화 과정을 추적할 수 있는 시스템을 개발

(a) Original image (b) Image processing

Fig. 1 Image processing of car on the road

하였고, 최근에는 이를 영상처리 기반으로 한 방식으로 전환하려는 움직임이 있다.

2. 연구의 필요성

이 연구의 최종 목적인 원전구조물은 원자력 에너지 공급 시스템을 포함하는 구조물로서 그 중요성이 매우 크므로 환경 변화 및 외부 교란에 대한 적극적인 대응책이 강구되어야 한다. 특히, 최근 점차 문제시 되고 있는 자연재해, 기후변화에 대한 구조적인 강성뿐만 아니라 운영 중 거동 안전성 확보가 필수적이다. 따라서 이러한 구조물은 구조안전성 평가를 위해 많은 계측 시스템(스트레인게이지, 변위-변환기, 가속도계, 비파괴 검사기 등)을 적용하여 구조물의 변화를 오랜 시간에 걸쳐 관찰하여야 한다. 원자로 건물 외벽에 대한 변형 실험(ILRT, integrated leakage rate test)은 원자로 내부에서 폭발에 의한 격납구조물의 변형에 관한 모의실험으로 원자로 내부에서 4 bar의 압력을 가하여 외부 격납구조물이 변형되는 실증 실험 계측이 진행된다. 기존에 사용하는 광섬유 센서나 코어 채취를 통한 미세구조 분석 등과 관련하여 영상처리 시스템의 성능을 확인 할 수 있으리라 생각된다.

이 연구에서는 ILRT실험에 앞서 원전구조물 진동변위, 속도 및 가속도에 관한 폭 넓은 자료 취득(다 측정점의 동시 계측, 어떠한 시간에서든지 자유로운 계측점 선정)이 가능할 수 있도록 영상처리(image processing) 개념을 이용한 새로운 정밀 계측시스템을 완성하여 실용화하려 한다. 이 개발 기술의 기본 설계는 구조물의 상하, 좌우(필요 시) 방향의 변위를 영상처리시스템을 이용하여 실시간으로 측정하고, 그 변화를 컴퓨터 모니터에 그래프로 표현

함으로써 최종적으로는 구조물의 변위, 속도, 가속도, 진동주파수를 파악할 수 있도록 하는 것이다.

3. 본 론

3.1 영상계측 시스템의 구성

영상계측 시스템은 CCD, 줌-렌즈, 쉐/틸트 시스템, 제진대, 컴퓨터로 구성된다. CCD와 컴퓨터는 IEEE 1394로 연결되며, 컴퓨터의 사용자 프로그램은 National Instrument의 LabView로 작성되었다. Fig. 2는 계측 시스템을 보여준다.

Fig. 3은 실험에 이용한 타겟을 보여준다. 흰색 바탕의 보드에 검정색 원을 부착하여 사용하였다. 밑단에 마이크로미터가 부착되어 있어 정적 인 움직임에 대한 변위계측 결과를 영상처리 결과와 비교할 수 있다.

Fig. 4와 Table 1은 이 연구에서 사용된 CCD의 사진 및 사양이다. 사양 중 영상처리에 있어 가장 중요한 사양이 해상도와 표본추출률이다. 해상도는

대상 구조물의 변위 정밀도에 직접적으로 영향을 미치며 표본추출률은 대상 구조물이 진동하는 경우 계측할 수 있는 진동수 대역에 영향을 준다. Table 1에서 보이는 바와 같이 CCD 장비가 초당 15 프레임을 획득할 수 있어 2 Hz 미만의 진동은 충분히 계측할 수 있다. 변위 정밀도는 CCD 카메라의 해상도뿐만 아니라 줌렌즈의 배율에 의해서 결정된다.

Fig. 5와 Table 2는 CCD와 연결된 줌렌즈의 사진과 사양이다. 타겟과의 최소거리는 약 5 m이며 분해능에 따라 타겟과의 거리 조절 및 타겟의 크기를 고려할 필요가 있다. 이 연구에서 사용한 타겟의 크기는 원의 지름을 10 mm로 고정하였으며 실험결과 타겟과의 거리가 30 m일 때 분해능이 1/10 mm 이내인 것을 확인하였다. 렌즈는 Fujinon사의 장비로 군용으로 사용되고 있다.

Fig. 6과 Table 3은 렌즈를 상하좌우로 움직일 수 있는 쉐/틸트 시스템의 사진과 사양을 보여준다. 이 장비는 -20 °C~60 °C 온도영역에서도 사용 가능하며 IP66인증을 받았다. 자체중량이 8.5 kg으로 다이캐스팅된 재질로 만들어졌다. 교류 서보모터를 이용하여 구동되며 모터 드라이버와 RS-422통신을 사용한다. 쉐/틸트 시스템은 전용 제어장치가 있는데

Fig. 2 Image processing system

Fig. 3 Target

Fig. 4 Viewrun CCD

Table 1 Specification for CCD

Model	DFK 41BF02
Resolution	1280×960 pixel
Frame	15 max
Mount type	C/CS
Communication	IEEE1394

동작거리는 최대 8 km이며 제어장치에서 렌즈의 줌, 포커스, 조리개 제어가 가능하다.

이 연구에서는 제진대를 사용하였는데 이유는 먼 거리에 있는 타겟을 줌렌즈를 이용하여 계측할 때 외부에서 발생한 진동의 영향을 제거하기 위한 것이다. 크기는 800×800 mm이며 제진효율은 10 Hz 이하 95 %, 20 Hz 이하 98 %이다.

3.2 영상계측 시스템을 이용한 실험

초기에 개발한 영상계측 시스템은 비주얼 베이직을

이용하여 프로그래밍되었으며 타겟은 삼각형을 이용하여 실험을 수행하였다. Figs. 7~9는 프로그램의 화면과 실제 실험장면을 보여준다.

Fig. 5 Fujinon Telephoto-zoom Lens

Table 2 Specification for lens

Model	D60×12.5BE-V41
Focal Length	12.5~750 mm
Iris	F3.8~T3000
Zoom operation	Servo motor drive
Focus operation	Servo motor drive
Iris operation	Auto or remote
Weight	5.1 kg

Fig. 6 PAN/TILT device

Table 3 Specification for PAN/TILT

Error	0.1°
TILT	+30° ~ -90°
PAN	360° continuous
Load	50 kg

Fig. 7 Image processing by Visual basic program

Fig. 8 Experimental setup

Fig. 9 Displacement measurement by IP, LVDT, and dial gauge, respectively

Fig. 8에서는 H-beam을 구조시험기를 이용하여 단위 하중별 변위계측을 수행하였다. 다이얼게이지와 LVDT(linear variable differential transformer)를 구조물의 중앙 아래에 장착하여 변위를 계측하였다. 또한, 영상처리 시스템은 중앙에 지름 32 mm 원형과 한 변 32 mm 정삼각형을 타겟으로 부착하여 변위를 계측하였다. Fig. 10은 하중에 대한 변위계측 결과를 보여준다. 이때 사용한 CCD의 해상도는 640×480이며 화소 당 8.5/100 mm의 분해능을 확보하였다. 렌즈는 일반 50 mm 줌-렌즈를 이용하였다.

Fig. 10 Curves for displacement and loaded weight using IP, LVDT and dial gauge

Fig. 2의 시스템을 이용하여 Fig. 3의 타겟을 부착한 마이크로미터를 0.1 mm 단위로 0~1 mm까지 이동시키고, 1 mm 단위로 1~4 mm까지 이동 시켜서 각각의 이동 위치마다 Fig. 11의 영상 계측 프로그램을 이용하여 영상 계측 변위 결과를 저장하고 정적인 변위의 변화에 대한 계측결과를 비교하여 Fig. 12에 도시하였다. 분해능은 화소당 0.0119 mm를 나타내었다.

Fig. 12 Static displacement by IP and micrometer

Fig. 11 Measurement program by LabView

DS1104보드를 이용하여 10 kHz 표본추출률로 데이터를 획득하였다. 얻어진 데이터는 파워 스펙트럼

Fig. 13 Experimental setup for Street light

(a) PSD by DS1104(dSPACE) (b) PSD by IP

Fig. 14 Comparison of PSD by IP system and vibration measurement system

밀도(power spectrum density, PSD)를 통하여 주파수를 추출하였다. 또한 15프레임의 CCD를 이용한 영상 계측 시스템을 이용하여 PSD를 확인한 결과와 비교되었다. 그 결과는 Fig. 14에 나타내었다. 가로등은 2.5 Hz와 5 Hz의 주파수 성분을 나타내었으며 두 시스템의 계측결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 15는 실험실내에서 2 m 길이의 외팔보에 10 mm 지름의 타겟을 부착하여 영상계측을 수행하였다. 또한, 저주파용 가속도계(10 V/g)와 레이저 변위 계측 장비를 이용하여 계측된 변위와 가속도를 영상계측 결과와 비교하였다.

Fig. 15 Experimental setup

Fig. 16 Measurement program by LabView

현재 개발하여 사용중인 영상처리 시스템은 Fig. 16과 같이 LabView를 이용하여 프로그래밍 하였다. 화면의 오른쪽 위의 2개 창은 X, Y 변위 그래프이며, 제일 아래로부터 위로 2개의 창은 속도와 가속도 그래프를 보여준다. 또한 중앙의 2개 그래프는 PSD결과를 보여준다. Fig. 17은 레이저 변위 계측기와 IP에 의해 계측된 동적변위 계측결과를 보여준다. Fig. 18은 가속도계와 IP에 의한 가속도 계측

결과를 보여준다. 변위 및 가속도 계측은 CCD의 해상도 및 프레임을 고려한 범위내에서 충분히 실용적임을 보여주고 있다.

Fig. 19는 타겟의 지름 크기가 다를 경우, 거리에 대한 분해능의 성능곡선을 보여준다. 5 m간격으로 거리를 5~40 m 이동시키고, 각각 지름이 다른 타겟을 위치시켜 화소 당 변위를 계측하였다. 결과로부터 거리가 멀어진다면 현재 사용하는 타겟의 크기가 무엇이든 일정한 값을 얻을 수 있을 것으로 판단한다. 예를 들어서, 거리 40 m에서는 타겟 지름이 10~100 mm사이의 것은 분해능이 0.1334 mm/pixel 임을 통계적으로 알 수 있다.

4. 결 론

현재 원전구조물의 진동물리량 계측은 제한적이고 수동적으로 평가되며, 사용되는 계측 시스템 또한 여러 가지 기술적인 단점을 내포하고 있다. 원자로 내부는 다양한 장치들이 구성되어 있어서 거리가 긴 경우, 일반적인 변형을 계측방법으로는 장치를 설치하기가 어렵고 보조적인 방법을 이용하더라도 직접적인 계측과 비교할 때 결과가 다르게 나타날 수 있다.

따라서 이러한 단점을 보완한 새로운 현장 적용이 가능한 변위 계측 시스템이 요구된다. 원전 구조물의 안전성 판단을 위해 보다 현실적인 상시 또는 주기적인 원전구조물 계측이 요구된다.

이러한 요구조건을 만족시키기 위하여 이 연구에서 제안한 영상처리 계측 시스템은 원형의 타겟을 CCD를 이용하여 화소 계산을 수행하고 이 결과를 분해능으로 환산하여 변위를 추출하였다. 계측된 변위 데이터를 기반으로 속도, 가속도, PSD에 대한 계산을 통하여 사용자가 한 화면에서 그래프로 확인할 수 있도록 하였다. 여러 검증 실험을 통하여 상당히 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다. 향후 원전구조물과 댐에 다수의 타겟을 설치하여 하나의 영상처리 시스템으로 구조물의 변위를 계측하는 실험을 수행할 예정이다.

후 기

이 연구는 “원전구조물 건전성 감시 시스템 개

Fig. 17 Dynamic displacement curves for laser vs. IP

Fig. 18 Acceleration curves for accelerometer vs. IP

Fig. 19 Curves for distance vs. resolution

발”의 지원에 의하여 이루어졌으며 관계자 분들께 감사드린다.

참 고 문 헌

- (1) Holman, J. P., 1994, Experimental Methods for Engineers, 6th ed., Mc-Graw Hill Book Co.
- (2) Suh, D. W., Lee, Y. J., Park, H. C., Yoon, K. J., Jee, G. I. and Park, C. G., 2000, 3 Dimensional Vibration Measurement of Structures Using GPS Carrier Phase, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 1303~1310.
- (3) Kim, K. Y. and Kwak, M. K., 2005, Measurement of Large-amplitude and Low-frequency Vibrations of Structures Using the Image Processing Method, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 329~333.
- (4) Wahbeh, A. M., Caffrey, J. P. and Masri, S. F., 2003, A Vision-based Approach for the Direct Measurement of Displacements in Vibrating Systems, Smart Structures and Materials, Vol. 12, No. 5, pp. 785~794.